



# Evaluation environnementale de bétons de granulats recyclés de béton et de béton de granulats recyclés de terre cuite à partir d'analyses de cycle de vie

Nicolas Serres, Sandrine Braymand, Françoise Feugeas

## ► To cite this version:

Nicolas Serres, Sandrine Braymand, Françoise Feugeas. Evaluation environnementale de bétons de granulats recyclés de béton et de béton de granulats recyclés de terre cuite à partir d'analyses de cycle de vie. Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, Nov 2014, Montpellier, France. hal-01144339

**HAL Id: hal-01144339**

**<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01144339>**

Submitted on 21 Apr 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

## Evaluation environnementale de bétons de granulats recyclés de béton et de béton de granulats recyclés de terre cuite à partir d'analyses de cycle de vie

Nicolas Serres<sup>\*1</sup>, Sandrine Braymand<sup>2</sup>, Françoise Feugeas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ICube, INSA de Strasbourg, CNRS; 24 Boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg Cedex, France

\* [nicolas.serres@insa-strasbourg.fr](mailto:nicolas.serres@insa-strasbourg.fr)

<sup>2</sup> ICube, Université de Strasbourg, CNRS; 72 Route du Rhin, BP 10315, 67411 Illkirch Cedex, France

**RESUME :** les granulats recyclés de béton, issus de la démolition, constituent de nos jours l'un des plus grands flux de déchets dans les pays développés. Cet article propose de quantifier les impacts environnementaux associés à la formulation de différents bétons en utilisant une analyse de cycle de vie (ACV). L'originalité de cette étude est d'évaluer les performances de trois bétons (naturel, recyclé et mixte), dont les formulations ont été définies en recherchant la même classe de résistance C35/45 (dosage en ciment fixé à 350 kg/m<sup>3</sup>) au regard de l'unité fonctionnelle. Trois autres échantillons – des micro-bétons (0/8 mm), formulés à partir de granulats naturels ou recyclés (béton ou terre cuite) – ont été élaborés avec comme critère de formulation une même composition volumique du squelette granulaire. Les résultats de l'ACV sont présentés selon différentes méthodes d'évaluation des impacts, en conformité avec les normes EN 15804 et NF P 01-010.

**ABSTRACT:** recycled concrete aggregates from demolition constitute one of the largest waste streams within the developed countries. This paper aims to quantify the environmental impacts related to the mixing composition of concrete materials by implementing a life cycle assessment (LCA). The originality of this study is to evaluate the performances of three concrete samples (natural, recycled and mixed), formulated to reach the same mechanical strength regarding the functional unit. Three micro-concrete samples, formulated with natural or recycled aggregates (concrete or terracotta brick), were also studied and developed with the same volume composition regardless to the granular skeleton. The LCA results are presented using various impact assessment methods, according to both EN 15804 and NF P 01-010 standards.

**MOTS-CLÉS :** Eco-conception, Analyse du cycle de vie (ACV), Béton de granulats recyclés, Granulats recyclés de terre cuite.

**KEYWORDS:** Ecodesign, Life cycle assessment (LCA), Recycled concrete aggregate, Recycled brick aggregate.

### 1. INTRODUCTION

L'activité du bâtiment requiert des quantités de matériaux (gravier, sable...) provenant principalement de sources naturelles et génère une importante quantité de déchets. Les préoccupations environnementales croissantes ; la saturation des sites d'enfouissement couplée aux coûts d'enfouissement des déchets ; l'épuisement rapide des granulats naturels dans certains pays développés, ainsi que la limitation des installations de stockage des déchets, incitent à la réduction de l'empreinte écologique du traitement des déchets et encouragent le recyclage des déchets de béton

issus de la démolition pour faire de nouveaux bétons [1]. Ces flux importants de déchets solides trouvent alors des applications dans la construction durable [2].

L'extraction abusive de granulats naturels a été mise en évidence au niveau international, du fait de l'épuisement de la quantité de ressources primaires, dans un contexte de développement durable [3]. Le domaine de la construction est responsable d'importants flux de déchets, ainsi que de consommations de matières et d'énergie conséquentes [4]. Le béton de granulats recyclés de démolition peut résoudre ce problème de pénurie et réduire la pollution et l'empreinte écologique associées à la construction [5].

Le béton fabriqué à partir de granulats recyclés de béton présente des propriétés mécaniques équivalentes au béton de granulats naturels si le béton d'origine est de bonne qualité [6]. Cependant, des problèmes de fabrication, tels qu'une absorption d'eau élevée ; la géométrie angulaire de ces granulats ; la distribution de la taille des particules de sable recyclées ou la substitution de sable naturel par du sable recyclé, limitent leur utilisation industrielle [7].

Ces dernières années, un intérêt croissant pour l'évaluation environnementale des matériaux cimentaires a été constaté [8]. L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée (ISO 14040 - 14044) permettant l'évaluation des flux de matières et d'énergies, ainsi que des impacts environnementaux potentiels d'un système (« produit » ou « service ») au cours de son cycle de vie. L'ACV est un outil d'évaluation qualitative et quantitative des avantages environnementaux d'un processus, permettant le classement des systèmes, y compris dans le domaine de la construction [9]. Les travaux récemment publiés sur l'évaluation environnementale des granulats recyclés de béton [10, 11] se focalisent essentiellement sur les impacts de la production globale par rapport au traitement des déchets, sans se soucier de la nature ou de l'origine des granulats.

Il semble donc intéressant d'évaluer l'impact environnemental de bétons en tenant compte de l'origine des granulats et, au-delà des matériaux, de la structure de l'assemblage. Trois types de bétons ont été étudiés : un béton traditionnel, élaboré avec des granulats naturels ; un béton recyclé, élaboré avec des granulats grossiers et du sable recyclés et un béton « mixte », élaboré avec des granulats recyclés et du sable naturel. En outre, des micro-bétons à base de déchets de granulats recyclés (béton de démolition) et de briques (terre cuite) ont été comparés à un micro-béton de granulats naturels.

## **2. PROCEDURE EXPERIMENTALE**

### **2.1. MATERIAUX**

Six échantillons de béton ont été étudiés (Tableau 1). Ils ont été fabriqués en utilisant la norme NF EN 206-1. Les granulats recyclés (gravier grossier et sable) proviennent du recyclage de déchets de démolition produits en Alsace. Les granulats naturels (roches silico-calcaires) sont issus d'une gravière alsacienne. Ces granulats naturels (roulés) ont été livrés sous trois classes granulaires : 0/4 mm ; 4/8 mm et 8/16 mm ; tandis qu'une classe granulaire (0/20 mm) a été livrée pour les granulats recyclés. Des coupes ont été réalisées pour obtenir trois classes 0/6,5 mm ; 6,5/13,5 mm et 13,5/20 mm. L'utilisation de terre cuite concassée (briques) comme granulat à béton a été envisagée. A partir d'une classe granulaire (0/20 mm), trois coupes ont été effectuées : 0/4 mm ; 4/8 mm et 8/20 mm.

Tableau 1 : Formulations des échantillons.

<b>Bétons</b>									
	Sable naturel	Sable recyclé	Granulat grossier naturel	Granulat grossier recyclé	Granulat fin naturel	Granulat fin recyclé	Ciment (CEM I)	Eau	Adjuvant
	kg/m <sup>3</sup>								
Traditionnel	685	–	1065	–	111	–	350	194	–
Mixte	759	–	–	852	–	115	350	180	2,6
Recyclé	–	769	–	424	–	442	350	165	10,5
<b>Micro-bétons</b>									
Volume de micro-béton = 1100 cm <sup>3</sup>									
	Sable 0/4 mm (g)	Granulat 4/8 mm (g)		Masse volumique du granulat (g/cm <sup>3</sup> )		Ciment (CEM II) (g)	Eau (g)	Adjuvant (%)	
Naturel	1000	675		2,5		450	225	–	
Brique		1105 (*)		1,6		450	225	5	
Recyclé	970	700		2,2		450	225	1	

\* : sable + granulat

### 2.1.1. Échantillons de bétons

La constitution du squelette granulaire des bétons a été établie selon la méthode de Dreux-Gorisse [12], avec des courbes granulométriques brutes (sans coupe supplémentaire) sable / gravillon / gravier. Les masses volumiques différentes des granulats ont été prises en compte pour la formulation, avec un volume de phase solide identique pour tous les échantillons. Trois types de béton ont été étudiés (Tableau 1) [13]. La composition est donnée en m<sup>3</sup> dans le cadre de l'unité fonctionnelle, avec un objectif de classe de résistance à la compression C35/45. Le ciment Portland CEM I 52.5N CE CP2 NF a été utilisé pour l'expérimentation. La teneur en ciment a été maintenue constante (350 kg/m<sup>3</sup>). Les autres paramètres ont été fixés selon la méthode de Dreux-Gorisse et la formule de Bolomey [14]. L'eau entrant dans la composition est considérée comme le volume total d'eau indépendamment de l'absorption des granulats.

Les échantillons de béton recyclé (BR) et de béton « mixte » (BM) contiennent un adjuvant superplastifiant (Sika® Viscocrete 5400 F), utilisé pour augmenter la fluidité du béton frais de façon à atteindre la maniabilité souhaitée. Les dosages de cet adjuvant (0,75% masse de ciment pour BM et 3% masse de ciment pour BR) ont été déterminés expérimentalement pour atteindre une classe d'affaissement S2 selon la norme EN 206-1.

### 2.1.2. Échantillons de micro-bétons

Trois autres types de béton, définis comme micro-bétons en raison de la dimension des granulats grossiers (8 mm), ont également été étudiés (Tableau 1). Dans ce cas, un autre objectif de formulation a été adopté [15]. La composition volumique du micro-béton naturel a été fixée de manière à obtenir une classe de résistance à la compression C30/35, avec un dosage en ciment (CEM II / AL 32,5 R CE CP2 NF) constant de 400 kg/m<sup>3</sup> et un dosage en eau fixé pour obtenir un rapport E/C de 0,5.

Les deux autres micro-bétons (micro-béton recyclé et micro-béton de brique) ont été formulés à compositions volumiques égales, seule la nature des granulats change. Les compositions en pourcentages massiques sont différentes, du fait de la masse volumique des trois granulats (Tableau 1). La même quantité d'eau a été utilisée, même si l'absorption est très dépendante du type de granulat. Les problèmes de mise en œuvre dus à la forte absorption d'eau des briques ont été résolus par l'utilisation d'un superplastifiant (Sika<sup>®</sup> Viscocrete 5400 F), permettant d'augmenter la fluidité des échantillons. La teneur en adjuvant a été déterminée expérimentalement pour atteindre une classe d'affaissement comprise entre S1 et S2 selon la norme EN 206-1.

## 2.2. ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES ECHANTILLONS

L'analyse de cycle de vie (ACV) a été réalisée selon la série de normes ISO 14040 – 14044. La figure 1 décrit le processus de production du béton et illustre la frontière du système considérée. L'unité fonctionnelle (U.F.) permettant la comparaison des échantillons a été définie comme un flux de référence, à savoir 1 m<sup>3</sup> de béton, et tient compte de l'ensemble des flux entrant et sortant (matériaux, énergie, transports, émissions...) nécessaires à la mise en œuvre des échantillons. Deux séries d'échantillons ont été comparées (bétons et micro-bétons) et dans les deux cas, l'U.F. suit un but spécifique : les trois bétons ont été formulés pour avoir la même classe de résistance, tandis que les trois micro-bétons ont été fabriqués pour avoir une composition volumique identique.

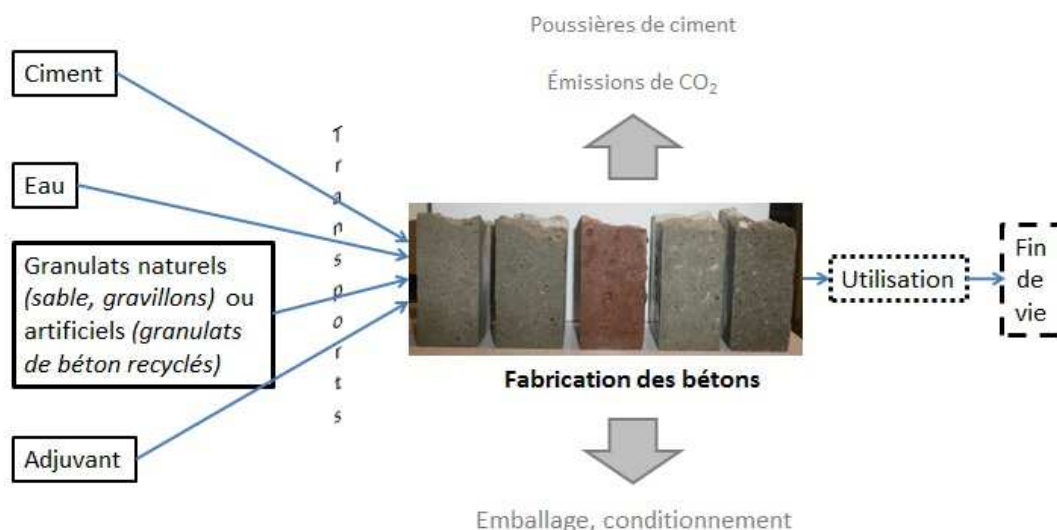


Figure 1 : Cycle de vie des échantillons étudiés.

Les comparaisons environnementales ont été effectuées avec le logiciel SimaPro (7.2) et les résultats sont présentés selon la méthode d'évaluation des impacts choisie. Différentes méthodes permettent en effet de caractériser les indicateurs d'impacts environnementaux de la norme européenne EN 15804 et son annexe nationale, ainsi que de la norme NF P 01-010, relative aux

fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES), qui est en cours de transposition selon ce format européen (Tableau 2).

Tableau 2 : Indicateurs d'impact évalués en fonction des méthodes d'analyse.

Indicateurs d'impacts	Unité	Norme		Méthodes			
		NF P 01-010	EN 15804	EDP	CML	EDIP	BEES
Consommation des ressources énergétiques	MJ	X	X	X			X
Épuisement des ressources (ADP)	kg éq. Sb	X	X		X		
Consommation d'eau	L	X					X
Déchets solides	kg	X				X	
Changement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	X	X	X	X	X	X
Acidification atmosphérique	kg éq. SO <sub>2</sub>	X	X	X	X		
Eutrophisation	kg éq. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>		X	X	X		
Pollution de l'air	m <sup>3</sup>	X			X	X	
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup>	X				X	
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC éq. R11	X	X	X	X	X	X
Formation d'ozone photochimique	kg éq. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	X	X	X	X		

Remarque : les méthodes EDIP et BEES considèrent également d'autres indicateurs d'impacts qui n'entrent pas dans le cadre normatif et réglementaire des FDES, et qui ne sont donc pas pris en compte dans cette étude.

La méthode EPD (Environmental Product Declaration) [16], spécifiquement utilisée pour effectuer une déclaration environnementale d'un produit, évalue les impacts selon des indicateurs d'impacts potentiels (« mid-point »). La méthode CML (Institute of Environmental Sciences) [17] comporte deux approches orientées : « problème », qui regroupe les indicateurs d'impacts « mid-point » ; et « dommage », qui regroupe les impacts en fonction des résultats dans la chaîne de cause à effet (« end-point »).

Les méthodes orientées « problème », qui permettent de caractériser les flux inventoriés en indicateurs d'impacts potentiels (« mid-point »), sont les plus répandues car elles considèrent plus d'indicateurs (une dizaine environ). Cependant, les méthodes « end-point », moins robustes scientifiquement, facilitent la compréhension et l'exploitation des résultats, grâce à une plus faible quantité d'indicateurs (trois en général : impacts sur la santé, les écosystèmes et les ressources).

Les méthodes EDIP (Environmental Design of Industrial Products) [18] et BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) [19], qui évaluent les impacts sur des indicateurs « mid-point », ont également été utilisées afin de prendre en compte les catégories d'impacts « consommation d'eau » ; « déchets solides » ; « pollution de l'air » et « pollution de l'eau ».

Dans le tableau 2, les catégories d'impact prises en compte par ces 4 méthodes, mais avec une unité différente, ne sont pas examinées. Par exemple, avec la méthode CML, la pollution de l'eau est représentée par l'indicateur d'impact « écotoxicité aquatique » (en kg éq. 1,4 DB<sup>1</sup>) et la pollution de l'air par les indicateurs d'impacts « toxicité humaine » (kg éq. 1,4 DB) et « écotoxicité terrestre » (kg éq. 1,4 DB). Enfin, le dernier niveau de caractérisation, qui considère un seul indicateur, permettant de traiter une seule valeur pour une analyse (score unique), n'est pas pris en compte dans cette étude.

### 2.3. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

Pour évaluer l'impact environnemental des échantillons, il est nécessaire de prendre en compte tous les matériaux (ciment, eau, granulats (extraits du minerai ou recyclés), adjuvants) et leurs processus d'élaboration. Dans le cas des granulats recyclés, les données ont été récoltées en 2007 sur site par l'union nationale des producteurs de granulats (UNPG) [20] et correspondent à une technologie moderne. Les données de l'adjuvant sont issues du syndicat national des adjuvants pour bétons et mortiers (SYNAD) et ont été collectées en 2006 [21]. Les autres données utilisées proviennent de la base de données EcoInvent et peuvent donc avoir des temporalités variables.

La production des échantillons est étudiée à l'échelle du territoire national. Ainsi les processus modulables au cas français (type mix énergétique) ont bien été adaptés. Cependant, la réalisation du bilan environnemental s'est appuyée sur la base EcoInvent, qui n'a pas toujours de données nationales. Pour toutes les étapes du cycle de vie, les flux entrants (matières premières, énergie, eau...) et sortants (émissions, déchets...) ont été pris en compte par rapport à l'unité fonctionnelle, avec une attention particulière aux consommations associées (transports, rendements...). La fabrication des outils de production du béton n'a pas été considérée.

## 3. COMPARAISONS ENVIRONNEMENTALES

L'analyse de cycle de vie (ACV) permet d'envisager une comparaison environnementale rigoureuse des différents échantillons. Cette ACV compare des indicateurs d'impacts environnementaux de matériaux de construction, en se basant sur des fonctions identiques pour les bétons d'une part, et les micro-bétons d'autre part.

### 3.1. COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE DES BETONS

Les indicateurs d'impacts environnementaux des bétons sont présentés dans le tableau 3, en accord avec les normes NF P 01-010 et EN 15804+A1. Il est possible de constater que le béton recyclé, et dans une moindre mesure le béton mixte présentent des impacts environnementaux plus faibles que le béton traditionnel. A l'exception de l'indicateur « acidification atmosphérique », tous les indicateurs d'impacts environnementaux relatifs à la norme EN 15804, qui fait actuellement office de référence, sont plus faibles pour le béton recyclé par rapport au béton mixte. Ce résultat traduit le fait que l'intégration de sable et de granulats recyclés dans la formulation de ce béton est réellement avantageuse sur ses performances environnementales.

L'augmentation de l'indicateur « acidification atmosphérique » peut en partie être expliquée par la présence d'un adjuvant superplastifiant dans les bétons mixte et recyclé. Le béton recyclé présentant à la fois la valeur la plus élevée et la teneur la plus élevée en adjuvant. En effet, lors de la synthèse

---

<sup>1</sup> 1,4-DB = dichlorobenzène

d'un superplastifiant, des substances possédant un fort potentiel d'acidification atmosphérique ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , acides...) sont rejetées à l'air.

Pour toutes les catégories, les différences entre les bétons recyclé et mixte et le béton traditionnel restent modérées car l'utilisation de matériaux recyclés (sable et/ou granulats) induit plus d'opérations, comme le broyage, le conditionnement...

Les indicateurs « changement climatique » et « pollution de l'air », assez conséquent, peuvent être liés aux émissions de substances organiques et de poussière dans l'air. Si les bétons mixte et recyclé présentent des valeurs plus faibles pour ces catégories d'impact, cela peut être en raison d'une réduction des transports (quantités de matériaux et distances), car ces échantillons sont formulés (totalement ou partiellement) avec du sable et des granulats recyclés. Il n'est donc pas nécessaire d'extraire et de transporter des matières premières à partir d'une carrière, ce qui limite les émissions de substances organiques et les émissions de poussières dans l'air. Par ailleurs, pour tous les échantillons, qui contiennent la même quantité de ciment (CEM I), ces catégories d'impacts peuvent être affectées par les émissions de  $\text{CO}_2$  issues de la fabrication du ciment.

Tableau 3 : Indicateurs d'impacts environnementaux des échantillons de bétons.

Catégories d'impacts	Unité	Béton mixte	Béton recyclé	Béton traditionnel
Consommation des ressources énergétiques	$10^3$ MJ	1,60	1,39	2,14
Épuisement des ressources (ADP)	kg éq. Sb	1,19	0,87	1,64
Consommation d'eau	$10^5$ L	6,67	5,85	7,80
Déchets solides	$10^2$ kg	9,87	8,88	1,88
Changement climatique	$10^2$ kg éq. $\text{CO}_2$	3,79	3,35	4,44
Acidification atmosphérique	kg éq. $\text{SO}_2$	1,08	1,22	0,86
Eutrophisation	kg éq. $\text{PO}_4^{3-}$	0,17	0,13	0,22
Pollution de l'air	$10^5$ m <sup>3</sup>	5,41	4,02	7,53
Pollution de l'eau	$10^3$ m <sup>3</sup>	2,72	2,22	3,38
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	$10^{-5}$ kg CFC éq. R11	2,10	2,01	2,87
Formation d'ozone photochimique	kg éq. $\text{C}_2\text{H}_4$	0,10	0,07	0,13

Remarques : pour les catégories d'impacts prises en compte par plusieurs méthodes d'évaluation des impacts, une valeur moyennée est considérée. Par ailleurs, les cases colorées représentent les valeurs des catégories d'impacts considérées par la nouvelle norme EN 15804.

La catégorie d'impact « consommation d'eau », également très conséquente, met en évidence le meilleur comportement des bétons recyclé et mixte par rapport au béton traditionnel. Ces échantillons contiennent moins d'eau dans leur formulation. Les granulats recyclés présentent des compacités variables étant donné qu'ils sont formés par des graviers grossiers et du sable, tandis que les



granulats naturels sont des roches roulées, issues de gravières. Le flux de matériaux granulaires (en kg) est donc plus faible par mètre cube de béton (mais identique en volume) : il y a un effet de dilution.

Enfin, concernant l'indicateur « déchets solides », plus conséquent pour le béton mixte et le béton recyclé que pour le béton traditionnel, le fait que les déchets de cet échantillon puissent être valorisés (sous forme de granulats pour faire du béton ou dans les travaux routiers par exemple) est un avantage. Cela permet de récupérer de la matière.

### 3.2. COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE DES MICRO-BETONS

L'évaluation environnementale des échantillons de micro-bétons est présentée dans le tableau 4. Le micro-béton recyclé, formulé avec du sable et des granulats recyclés, présente un excellent bilan environnemental dans la mesure où toutes les catégories d'impacts relatives à la norme EN 15804 sont plus faibles (ou équivalente pour l'acidification atmosphérique) par rapport au micro-béton naturel. Le comportement global de ces deux échantillons est en accord avec ce qui a été observé pour les bétons dans la partie précédente. Il est également possible de constater que le micro-béton de brique présente un bon bilan environnemental, plus proche de celui du micro-béton recyclé que du micro-béton naturel.

Tableau 4 : Indicateurs d'impacts environnementaux des échantillons de micro-bétons.

Catégories d'impacts	Unité	Micro-béton de brique	Micro-béton naturel	Micro-béton recyclé
Consommation des ressources énergétiques	10 <sup>3</sup> MJ	1,87	2,22	1,29
Épuisement des ressources (ADP)	kg éq. Sb	0,99	1,70	0,90
Consommation d'eau	10 <sup>5</sup> L	6,37	8,45	6,66
Déchets solides	10 <sup>2</sup> kg	6,33	0,19	7,15
Changement climatique	10 <sup>2</sup> kg éq. CO <sub>2</sub>	3,66	4,69	3,57
Acidification atmosphérique	kg éq. SO <sub>2</sub>	0,98	0,75	0,90
Eutrophisation	kg éq. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,15	0,23	0,13
Pollution de l'air	10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup>	6,44	8,77	4,76
Pollution de l'eau	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	2,52	3,56	2,39
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	10 <sup>-5</sup> kg CFC éq. R11	2,67	2,96	1,65
Formation d'ozone photochimique	kg éq. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,06	0,14	0,07

Remarques : pour les catégories d'impacts prises en compte par plusieurs méthodes d'évaluation des impacts, une valeur moyennée est considérée. Par ailleurs, les cases colorées représentent les valeurs des catégories d'impacts considérées par la nouvelle norme EN 15804.

Pour les trois micro-bétons, les résultats sont plus prononcés par rapport aux trois bétons, ce qui peut être attribué à la formulation spécifique de ces échantillons, réalisés avec la même composition volumique, les proportions massiques sont de ce fait différentes. A nouveau, une contribution du

ciment (CEM II) peut être considérée et impliquer des émissions importantes de CO<sub>2</sub>, d'autant plus que la quantité de ciment utilisée pour fabriquer les échantillons de micro-bétons est proportionnellement plus élevée que dans le cas des échantillons de béton (350 kg/m<sup>3</sup> contre 205 kg/m<sup>3</sup>), ce qui peut sensiblement modifier les résultats de l'ACV. En effet, bien que les unités fonctionnelles ne soit rigoureusement pas les mêmes, une comparaison entre le béton traditionnel (Tableau 3) et le micro-béton naturel (Tableau 4) met en évidence des résultats d'ACV légèrement supérieurs pour le micro-béton. Une analyse équivalente peut être faite avec le béton recyclé et le micro-béton recyclé.

La différence des résultats de l'ACV des trois micro-bétons peut être amplifiée par rapport aux bétons dont la formulation a pour objectif une résistance mécanique équivalente, en raison d'une quantité de ciment qui pourrait être réduite dans le cas du micro-béton de brique.

## 4. CONCLUSIONS

Les résultats de l'ACV mettent en évidence que l'utilisation de sable et/ou de granulats recyclés est intéressante pour réduire les impacts environnementaux des échantillons de béton et de micro-bétons, même si l'utilisation de matériaux recyclés induit différentes opérations par rapport à l'extraction. Ces résultats, obtenus avec différentes méthodes d'évaluation des impacts (EDP, CML, EDIP et BEES), en accord avec la norme NF P 01-010 et surtout la nouvelle norme EN 15804, mettent en évidence que, pour la grande majorité des catégories d'impact prises en compte, les échantillons (béton et micro-bétons) recyclés présentent des valeurs plus faibles. Seules les catégories d'impact « acidification atmosphérique », du fait de l'utilisation d'adjuvant, et « déchets solides », du fait d'une valorisation plus conséquente pour le béton traditionnel et le micro-béton naturel, sont à l'avantage des échantillons références. Par ailleurs, le micro-béton de brique présente un faible impact environnemental par rapport aux deux autres micro-bétons. Les granulats de cet échantillon présentent une faible masse volumique, ce qui peut légèrement diminuer les impacts environnementaux associés aux opérations de transport.

Le développement des bétons à base de granulats recyclés peut être intéressant pour limiter le stockage des déchets de construction, afin de diminuer les surfaces de stockage de ces déchets et l'empreinte écologique de ces sites.

## REFERENCES

1. A.M. Wagih, H.Z. El-Karmoty, M. Ebid, S.H. Okba, *Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete*, HBRC Journal 9 (3) (2013) 193-200
2. M. Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, S. Maiti, *Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review*, Construction and Building Materials 68 (2014) 501-516
3. S. Ismail, K.H. Hoe, M. Ramli, *Sustainable Aggregates: The Potential and Challenge for Natural Resources Conservation*, Procedia - Social and Behavioral Sciences 101 (2013) 100-109
4. D. Krajnc, P. Glavič, *A model for integrated assessment of sustainable development*, Resources, Conservation and Recycling 43 (2) (2005) 189-208

5. C.-H. Lee, J.-C. Du, D.-H. Shen, *Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt*, Construction and Building Materials 28 (1) (2012) 66–71
6. J. Xiao, Y. Huang, J. Yang, C. Zhang, *Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression*, Construction and Building Materials 26 (1) (2012) 591-603
7. M.N. Soutsos, K. Tang, S.G. Millard, *Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate*, Construction and Building Materials 25 (2) (2011) 726-735
8. P. Van den Heede, N. De Belie, *Environmental impact and LCA of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations*, Cement and Concrete Composites 34 (4) (2012) 431-442
9. O. Ortiz, F. Castells, G. Sonnemann, *Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA*, Construction and Building Materials 23 (1) (2009) 28-39
10. G.A. Blengini, E. Garbarino, S. Šolar, D.J. Shields, T. Håmor, R. Vinai, Z. Agioutantis, *LCA guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: the Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMa)*, Journal of Cleaner Production 27 (2012) 177-181
11. A. Jullien, C. Proust, T. Martaud, E. Rayssac, C. Ropert, *Variability in the environmental impacts of aggregate production*, Resources, Conservation and Recycling 62 (2012) 1-13
12. J.P. Ollivier, J. Baron, *Les bétons : Bases et données pour leur formulation*, Eyrolles, Construction béton (1997), n° ISBN : 2-212-01316-7
13. S. Braymand, P. François, F. Feugeas, C. Fond, *Rheological Properties of Recycled Aggregate Concrete Using Superplasticizers*, Journal of Civil Engineering and Architecture, in Press
14. J. Bolomey, *Détermination de la résistance à la compression des mortiers et bétons*, Bulletin Technique de la Suisse Romande 14 (1925) 126-133 et 169-173
15. S. Braymand. *Study of rheological and mechanical properties of recycled brick aggregate concrete*. Proceedings of the WASCON 2012. Gothenburg, Sweden
16. R. Manzini, G. Noci, M. Ostinelli, E. Pizzurno, *Assessing Environmental Product Declaration Opportunities: a Reference Framework*, Business Strategy and Development 15 (2) (2004) 118–134
17. R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.J. Althaus, G. Doka, R. Dones, R. Hirschier, S. Hellweg, S. Humbert, M. Margni, T. Nemecek, M. Spielmann, *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0.ecoinvent report No. 3*, Swiss centre for LifeCycle Inventories, Dübendorf, Switzerland (2007)
18. M. Hauschild, J. Potting, *Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology*. Institute for Product Development Technical University of Denmark (2003)
19. B. Lippiatt, A. Landfield Greig, P. Lavappa, *The BEES software, a web application*. The National Institute of Standards and Technology (NIST) (2010)
20. UNPG, *Module d'informations environnementales de la production de granulats recyclé* (2011)
21. SYNAD, *Déclaration environnementale – Superplastifiants* (2006)